

## ارزیابی تأثیر پارامترهای خاک بر رفتار شیروانی خاکی اصلاح شده با میخکوبی

احد باقرزاده خلخالی<sup>۱\*</sup> و سیدمجتبی قدمگاهی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران

(دریافت: ۹۶/۳/۲۵، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۶/۳۱)

### چکیده

بررسی پایداری شیروانی‌ها از مسائل حائز اهمیت مهندسی ژئوتکنیک بوده و پیوسته مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. یکی از روش‌های محاسبه ضریب اطمینان به وسیله برنامه‌های اجزای محدود یا تفاضل محدود، کاهش مقاومت برشی خاک تا وقوع ریزش و گسیختگی شیروانی است. در مطالعه حاضر از نرم‌افزار FLAC بر پایه روش کاهش مقاومت برشی جهت بررسی رفتار شیروانی خاکی مسلح شده به روش میخ‌کوبی استفاده شده است. هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر رفتار شیروانی خاکی مسلح به روش میخ‌کوبی می‌باشد. برای این منظور تأثیر پارامترهای مقاومت برشی خاک ( $c$  و  $\phi$ )، ضریب ارتجاعی، مدول پواسون و وزن مخصوص خاک بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی، نیروی میخ‌ها و تغییر مکان کل بر مدل دو بعدی شیروانی خاک مسلح بررسی شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. برای به دست آوردن رابطه ریاضی از نرم‌افزار EPR (رگرسیون چند جمله‌ای تکامل یافته) استفاده شده است. همچنین تحلیل حساسیت برای ارزیابی تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی بر متغیرهای خروجی انجام شده است.

**کلیدواژه‌ها:** میخ‌کوبی، پایداری شیروانی خاکی، رگرسیون چند جمله‌ای تکامل یافته، تحلیل حساسیت.

### ۱- مقدمه

حالت عمودی، برای رسیدن به ضریب اطمینان قابل قبول باید زاویه مسلح‌کننده‌ها با افق کاهش یابد و با افزایش زاویه سطح خاکریز باید به زاویه آنها با افق افزوده شود. در مطالعات آنها وزن مخصوص خشک خاک برابر با  $16 \text{ kN/m}^3$ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر با  $30^\circ$  درجه و چسبندگی خاک برابر با  $50$  کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. ضریب پواسون خاک نیز برابر با  $0.3$  فرض شد. با وجود این که تحقیق آنها توانست نقص کارهای گذشته یعنی در نظر نگرفتن هندسه‌های مختلف شیروانی را برطرف نماید، اما به دلیل در نظر نگرفتن خاک با پارامترهای مقاومتی مختلف کمبودهایی در کار آنها وجود داشت. به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف میخ‌کوبی خاک بر ضریب اطمینان شیب، Jiang و Tang در سال  $2015$  به تحلیل پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio با روش‌های تحلیل مختلف پرداختند. آنان پارامترهایی همچون زاویه شیب میخ، فاصله افقی میخ، قطر و طول میخ را با استفاده از روش مورگنسترن-پرایس<sup>۱</sup> ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که شیب با زاویه میخ‌کوبی  $15$  درجه بیشترین

میخ‌کوبی روشی برای پایداری‌سازی شیروانی است که آرایشی از میخ‌های کار گذاشته شده در زمین را مورد استفاده قرار می‌دهد (Goldstein, 2001). از روش میخ‌کوبی می‌توان برای شیروانی‌های موقت و دائمی بهره برد. این روش همچنین برای تقویت شیروانی‌ها یا اصلاح خاکریزهای در حال لغزش و دیوارهای وزنی قابل استفاده است. میخ‌کوبی به‌طور معمول در سنگ‌های ریز و رس‌های سخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مناطقی که مقدار مصالح رسی زیاد است میخ‌کوبی بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد (KUTC, 2006).

Luo و Fan در سال  $2008$ ، در ادامه تحقیقات قبلی خود با بررسی هندسه‌های مختلف توسط برنامه اجزای محدود، جدولی ارائه نمودند که طبق آن زاویه بهینه میخ طبق هندسه خاک مشخص می‌گردد. در مطالعات آنها زاویه شیروانی بین  $40^\circ$  تا  $90^\circ$  درجه و زاویه پشت سطح خاکریز بین  $0^\circ$  تا  $20^\circ$  درجه تغییر می‌کرد. آنها نشان دادند که با افزایش شیروانی دیوار و نزدیک شدن آن به

1. Morgenstern-Price method

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۱۰۲۳۵۱۹

آدرس ایمیل: a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (ا. باقرزاده خلخالی)، min\_moj@yahoo.com (س. م. قدمگاهی).

نیروهای کششی در داخل مصالح میخ کوبی شده، در حد میلی متر می باشند. این تحقیقات نشان می دهند که حداکثر این تغییر مکان ها در حدود ۰/۰۳ درصد ارتفاع دیوار می باشند (Guilloux و همکاران، ۱۹۸۳).

پژوهش ها نشان می دهند که در خاک های دانه ای کوبیده شده، اصطکاک بین خاک و مصالح تسلیح بستگی کامل به رفتار اتساعی خاک دارد. تحت تنش های برشی بسیج شده در ناحیه فصل مشترک، خاک دانه ای که در نزدیکی ناحیه تسلیح قرار دارد، تمایل به اتساع خواهد داشت. اما این اتساع توسط توده خاک اطراف و بالای آن محدود می شود. این اثر محدود کننده به علت تمرکز تنش های قائم وارد بر ناحیه تسلیح می باشد که تابعی از وزن خاک بالای آن قسمت مسلح شده است.

ساختار اساسی سازه های مسلح شده با میخ، تولید نیروی کششی در مسلح کننده ها بر اثر گیرداری می باشد و با این کار در میخ ها و وجه جلویی دیوار تغییر شکل به وجود خواهد آمد. در هنگام بازسازی سازه های موجود به دلیل نگهداری غیر مناسب، تغییر شکل ها همراه با حرکت دیواره ها و شیروانی ها می باشد. در هر یک از موارد مسلح کننده ها باعث نگهداری و کنترل تنش ها و کرنش هایی می شوند که باعث خرابی سازه های نگهداری شده می شوند. این مسلح کننده ها به صورت زاویه دار کار گذاشته می شوند تا بتوان از حداکثر نیروی کششی آنها بهره برد.

نیروهای ایجاد شده در میخ ها در ابتدا به دلیل اندرکنش اصطکاک بین خاک و میخ و در ادامه به دلیل اندرکنش خاک-سازه بین خاک و وجه جلوی دیوار به وجود می آید. مورد اخیر باعث ایجاد نیروی کششی در سر میخ می شود (در محل اتصال میخ به وجه جلوی دیوار) و این نیروی تولیدی در سر میخ معمولاً بخشی از نیروی حداکثر ایجاد شده در میخ می باشد. ایجاد حداکثر نیروی کششی در هر میخ که در داخل خاک قرار دارد، بستگی به محل قرارگیری قائم میخ دارد (مقدار سربار روی هر میخ).

هدف از مطالعه حاضر تحلیل شیروانی خاکی مسلح شده با میخ کوبی توسط نرم افزار FLAC و محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی برای هر مدل است. به منظور دستیابی به رابطه ای میان پارامتر خروجی (ضریب اطمینان) و پارامترهای ورودی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی زهکشی نشده، وزن مخصوص، ضریب ارتجاعی و مدول پواسون خاک) از نرم افزار EPR استفاده می گردد. همچنین تحلیل حساسیت برای پیش بینی ضریب اطمینان، بیشینه نیروی میخ و تغییر مکان انجام می شود.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مدل سازی

در مدل حاضر شیروانی خاکی همگن با ارتفاع شیروانی معادل ۶ متر و زاویه شیروانی ۴۵ درجه و فاصله عمودی میخ ها ۱/۵ متر

ضریب اطمینان را دارد. با افزایش فاصله افقی میخ ضریب اطمینان کاهش می یابد و مقدار قابل قبول فاصله افقی برابر ۲ متر یا کمتر است. همچنین ضریب اطمینان با افزایش قطر و طول میخ به صورت خطی افزایش می یابد. هر چند زمانی که طول میخ تقریباً برابر با ارتفاع شیروانی خاکی می گردد، ضریب اطمینان کمی افزایش می یابد. Singh در سال ۲۰۱۷ نتایج مطالعه عملی بر روی رفتار شیروانی های خاکی مسلح نشده و میخ کوبی شده تحت بارگذاری های استاتیکی مختلف را منتشر کرد. شیروانی ها از ماسه ساخته شدند و زاویه شیروانی با افق ۶۰ درجه در نظر گرفته شد. برای مشاهده رفتار بار- نشست، بارهای استاتیکی مختلف بر روی صفحه بارگذاری روی تاج شیروانی خاکی اعمال شد. شیروانی های خاکی با میله های آلومینیومی به عنوان میخ با سه شیب مختلف ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه با فاصله افقی و قائم ۱۰ سانتی متر مسلح شدند. مشاهده شد که میخ های افقی در تأمین پایداری شیروانی ها از میخ های مایل مؤثرتر هستند.

Askari و Gholami در سال ۲۰۱۷، به مطالعه عددی برای یافتن الگوی بهینه میخ کوبی تحت شرایط مختلف پرداختند. آنان سه هندسه متفاوت شیروانی میخ کوبی شده تحت دو سربار مختلف را برای بررسی ضریب اطمینان و جابه جایی تاج دیوار در نظر گرفتند. اثر بخش های مختلف در ارتفاع دیوار بر دو پارامتر مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. در شیروانی های میخ کوبی شده قائم، بیشترین ضریب اطمینان در زاویه میخ بین ۰ تا ۱۰ درجه به دست آمد. در تمام شیروانی های میخ کوبی شده، پس از طول مشخصی از میخ (نقطه کاهش)، افزایش طول میخ اثری بر جابه جایی تاج دیوار نداشته است. نتایج نشان داد که یک سوم بالایی شیروانی خاکی بیشترین تأثیر را بر جابه جایی تاج دیوار داشته است. این در حالی است که یک سوم پایینی شیروانی بیشترین تأثیر را بر ضریب اطمینان داشته است.

Zhou و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه ای به مدل سازی سه بعدی تسلیح شیروانی های تحت سربار به روش میخ کوبی پرداختند. این مطالعه جهت بررسی رفتار شیروانی تحت سرباری که در یک آزمایش صحرایی به روش میخ کوبی مسلح شده بود، انجام گرفت. به منظور مطالعه تغییر شکل داخلی شیروانی و گسترش نیروهای میخ حین اعمال سربار بالای شیروانی، تحلیل های الاستوپلاستیک انجام گرفت. پیش بینی های عددی انجام شده توسط این محققین در مقایسه با آزمایش صحرایی واقعی نتایج قابل قبول و قابل مقایسه ای نشان داد. نتایج صحرایی و عددی هر دو نشان دادند که میخ کوبی پیشنهادی در افزایش پایداری کلی یک خاکریز سست برای شرایط بارگذاری در نظر گرفته شده در مطالعه، موفق عمل کرده است.

تحقیقات انجام شده بر روی مدل های حقیقی و آزمایشگاهی نشان می دهد که تغییر مکان نسبی جانبی لازم جهت بسیج شدن

## ۲-۲- روش EPR

برای ارزیابی قابلیت استفاده از روش EPR در به دست آوردن روابط غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی، دقت هر مدل پیشنهادی برای هر کاربرد مشخص بر اساس ضریب تعیین<sup>۲</sup> (COD) بررسی می‌شود که به صورت رابطه زیر قابل حصول است:

$$COD = 1 - \frac{\sum_N (Y_a - Y_p)^2}{\sum_N (Y_a) - \frac{1}{N} \sum_N Y_a)^2} \quad (1)$$

که در آن  $Y_a$  مقدار اندازه‌گیری شده واقعی،  $Y_p$  مقدار پیش‌بینی شده و  $N$  تعداد نمونه‌ها است.

روش EPR یک تکنیک رگرسیون داده محور است بر پایه محاسبات تکاملی که هدف از آن یافتن ساختار چندجمله‌ای است که بتواند یک سیستم را ارائه کند. EPR که نخستین بار توسط Savic و Giustolisi در سال ۲۰۰۶ ارائه شد، در حل بسیاری از مسائل مهندسی عمران مورد استفاده قرار گرفته است.

این برنامه با ادغام ویژگی‌های رگرسیون‌های عددی با الگوریتم ژنتیک و رگرسیون‌های نمادین سیستم موردنظر را با بهره‌گیری از خواص ریاضی ساختار چند جمله‌ای در قالب عبارات چند جمله‌ای تکاملی ارائه می‌کند. ایده اصلی EPR استفاده از جستجوی تکاملی برای یافتن توان چند جمله‌ای‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک است.

به طور کلی EPR یک الگوریتم دو مرحله‌ای است. در ابتدا برنامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک استاندارد بهترین ساختار عبارات را پیدا می‌کند و در مرحله بعد با اعمال رگرسیون حداقل مربعات بهترین ترکیب پارامترهای ورودی را پیدا می‌کند. بدین ترتیب یک جستجوی هم‌زمان برای یافتن بهترین ترکیب پارامترها و توان‌های مربوطه تعریف شده توسط کاربر اعمال می‌گردد. شکل کلی عبارات به دست آمده از EPR به صورت زیر است:

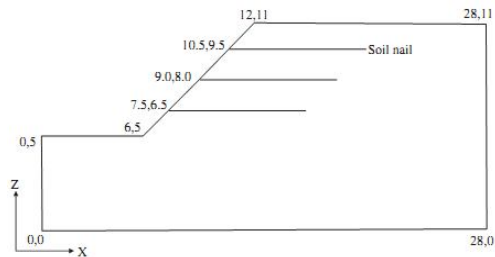
$$y = \sum_{j=1}^m F(X, f(X, a_j)) + a_0 \quad (2)$$

که در آن  $y$  بردار تخمین یافته خروجی است،  $a_j$  عدد ثابت،  $F$  تابعی است که در پروسه تکاملی ایجاد می‌شود،  $X$  ماتریس پارامترهای ورودی،  $f$  تابعی است که توسط کاربر تعریف می‌شود و  $m$  تعداد پارامترهای ورودی است.

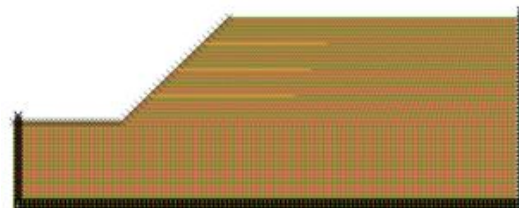
در نظر گرفته شده است (شکل (۱)). در تمام تحلیل‌ها وزن مخصوص خاک، ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون خاک به ترتیب معادل  $20-18 \text{ kN/m}^3$ ،  $25-15 \text{ Mpa}$  و  $0.2-0.35$  فرض شده‌اند. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز به ترتیب  $20 \text{ kPa}$  و  $5-45$  درجه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مشخصات سیستم دوغاب-خاک-میخ مطابق جدول (۱) در مدل‌سازی فرض شده است.

قطر میخ‌های فولادی با مشخصات داده شده در جدول (۱)،  $40 \text{ mm}$  و قطر حفره میخ‌گذاری  $100 \text{ mm}$  فرض شده است (Cheng و Wei، ۲۰۱۰).

شکل (۲) المان‌بندی شیروانی خاکی موردنظر برای انجام تحلیل‌ها را در نرم‌افزار FLAC نشان داده است. نتایج حاصل از تحلیل ۶۵ مورد شیروانی خاکی مسلح شده به روش میخکوبی در پیوست (۱) آورده شده است.



شکل ۱- هندسه مدل شیروانی خاکی مورد مطالعه



شکل ۲- المان‌بندی شیروانی خاکی مورد مطالعه

### جدول ۱- مشخصات سیستم دوغاب-خاک-میخ

(Cheng و Wei، ۲۰۱۰)

۴۵/۴۴	$E$ (GPa) ضریب ارتجاعی میخ دوغاب‌کاری شده،
۱/۴۱	مقاومت (نیروی) چسبندگی بر واحد طول ناحیه برشی، $C_g$ (kN/m)
۹/۲۳	زاویه اصطکاک ناحیه برشی (درجه) $\phi_B$
۴۳/۱	سختی بر واحد طول ناحیه برشی $k_B$ (Mpa)
۰/۳۳۹	محیط ناحیه برشی $p_B$ (m)
۰/۰۷۸۵	مساحت سطح مقطع میخ دوغاب‌کاری شده $A$ ( $\text{m}^2$ )
۰/۲۳۸	مقاومت تسلیم فشاری میخ دوغاب‌کاری شده $F_c$ (MN)
۰/۲۳۸	مقاومت تسلیم کششی میخ دوغاب‌کاری شده $F_t$ (MN)

### ۲-۳- نتایج تحلیل حساسیت

برای تعیین تأثیرگذارترین عوامل بر ضریب اطمینان پایداری شیب، بیشینه نیروی میخ و بیشینه تغییر مکان از تحلیل حساسیت با روش دامنه کوسینوس استفاده شده است. این روش برای بیان روابط تشابه میان پارامتر ورودی و تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang و Yang، ۱۹۹۷ و Monjezi و همکاران، ۲۰۰۹). تمام داده‌ها در یک فضای  $k$  بعدی تعریف می‌شوند و پارامترها به شکل مستقیم به خروجی مرتبط می‌گردند. در روش مذکور هر پارامتر ورودی به صورت یکی از آرایه‌های بردار  $X$  که در معادله زیر نشان داده شده است، بیان می‌شود (Singh و Khandelwal، ۲۰۰۶ و Monjezi و همکاران، ۲۰۱۰):

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n\} \quad (3)$$

که هر کدام از اجزای آن برداری با طول  $m$  است و در معادله زیر نشان داده شده است:

$$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\} \quad (4)$$

قدرت این ارتباط بین  $x_i$  و  $x_j$  را می‌توان با رابطه زیر محاسبه نمود (Singh و Khandelwal، ۲۰۰۶):

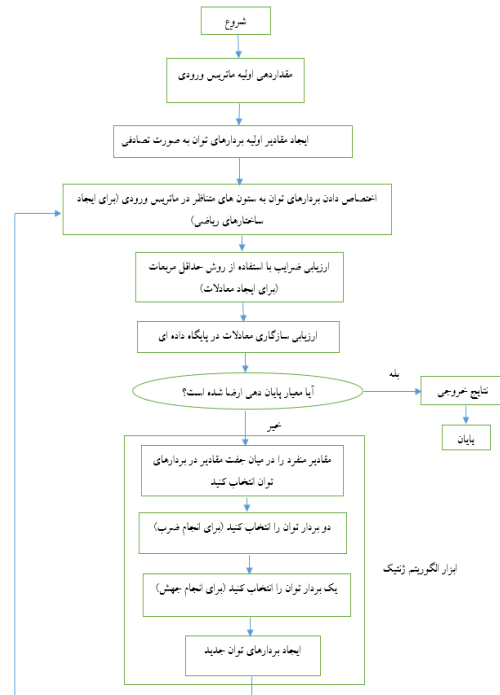
$$r_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^k x_{im}x_{jm}}{\sqrt{\sum_{m=1}^k x_{im}^2 \sum_{m=1}^k x_{jm}^2}} \quad (5)$$

در این رابطه،  $k$  تعداد داده‌ها،  $x_i$  داده‌های ورودی و  $x_j$  داده‌های خروجی هستند. هرچه مقدار  $r_{ij}$  بیشتر باشد، تأثیر متغیر ورودی بر متغیر خروجی بیشتر است.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تأثیر پارامترهای مقاومت برشی خاک بر ضریب اطمینان

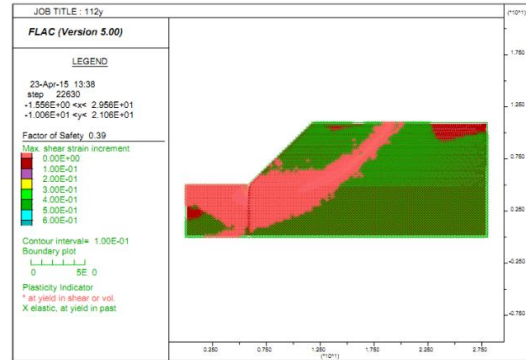
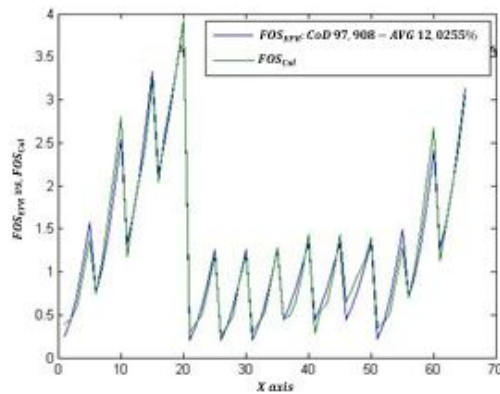
مقایسه سطوح شکست نشان می‌دهد که در اغلب موارد با چسبندگی یکسان، افزایش زاویه اصطکاک داخلی منجر به نزدیک شدن سطح شکست به سطح شیروانی می‌گردد. در بررسی نتایج تحلیل‌ها مشاهده شد که به طور کلی افزایش هر یک از مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک منجر به افزایش ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی مسلح می‌گردد. به طوری که کم‌ترین ضریب اطمینان برای نمونه با  $c=2\text{kPa}$  و  $\phi=5^\circ$  به میزان  $0.39$  و بیشترین ضریب اطمینان برای نمونه با  $c=20\text{kPa}$  و  $\phi=45^\circ$  به میزان  $3/91$  حاصل شده است. به دلیل کثرت تعداد نمونه‌ها، تنها سطوح شکست مربوط به ۲ نمونه اخیر در شکل‌های (۴) و (۵) آورده شده است.



شکل ۳- دیاگرام عمومی پروسه EPR (رضانیا و همکاران، ۲۰۰۸)

در پروسه تکاملی ساخت مدل‌های EPR، به منظور کنترل مدل خروجی محدودیت‌هایی از جمله تعداد ترم‌های عبارت، محدوده توان‌ها و تعداد دفعات اجرای پروسه اعمال می‌گردد. در این فرآیند برای یک مسئله خاص چندین مدل مختلف به دست می‌آید که این توانایی اطلاعات اضافی نیز راجع به مسئله برای کاربر فراهم می‌کند.

با اعمال پروسه EPR، پروسه تکاملی با مقدار میانگین ثابتی از خروجی شروع به کار می‌کند. پروسه تکاملی به منظور جلوگیری از رشد سریع طولی عبارات ریاضی با زمان به کارگرفته می‌شود. پروسه تکاملی در هر مرحله عباراتی را با افزایش تعداد ترم‌ها ارائه می‌کند تا جایی که به حداکثر تعداد ترم مشخص شده توسط کاربر برسد. پروسه EPR با فرارسیدن معیار اتمام پروسه که می‌تواند حداکثر تعداد ترم‌های عبارت ریاضی و یا میزان مشخصی از خطا باشد، متوقف می‌شود. مدل‌های به دست آمده با استفاده از داده‌های ورودی آموزش داده می‌شوند و با تعدادی داده صحت‌سنجی، تست می‌شود. سطح دقت مدل‌های به دست آمده با استفاده از ضریب تعیین مشخص می‌شوند. در صورتی که دقت مدل به دست آمده قابل قبول نباشد، برنامه وارد چرخه تکاملی دیگری می‌شود. شکل (۳) دیاگرام عمومی پروسه EPR را نشان می‌دهد.



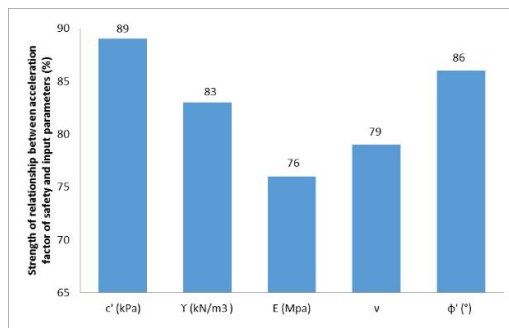
شکل ۴- سطح شکست و ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی ( $c=2kPa$  و  $\phi=5^\circ$ )

شکل ۶- دیاگرام مقایسه مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده و پیش‌بینی شده

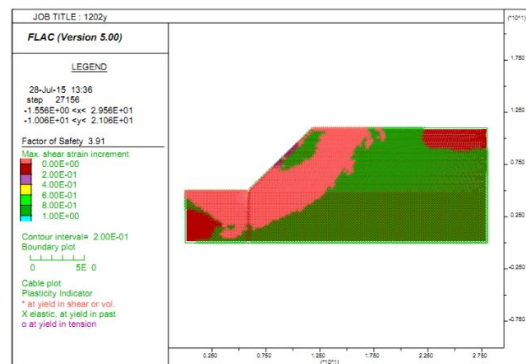
### ۳-۲- نتایج تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۷)، در محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به ترتیب بیشترین تأثیر را داشته‌اند. در حالی که تأثیر مدول ارتجاعی خاک از سایر پارامترهای ورودی کمتر بوده است. همچنین در شکل (۸) مشاهده می‌شود که در رابطه با بیشینه نیروی خاک، تأثیر مدول ارتجاعی، مدول یانگ، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک تقریباً یکسان بوده و از میان چسبندگی خاک کمترین تأثیر را داشته است.

با مشاهده شکل (۹) نیز می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای محاسبه بیشینه تغییر مکان در شیروانی خاکی، تأثیر مدول ارتجاعی، مدول یانگ و وزن مخصوص خاک بیشتر و تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک کمتر از سایر پارامترها بوده است.



شکل ۷- تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی ضریب اطمینان پایداری شیب



شکل ۵- سطح شکست و ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی ( $c=20kPa$  و  $\phi=45^\circ$ )

### ۳-۲- نتایج EPR

برای تعداد ۶۵ سری داده مربوط به ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی که از تحلیل مدل در نرم‌افزار FLAC حاصل شده است، از روش رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی جهت دستیابی به رابطه‌ای میان ضریب اطمینان به‌عنوان متغیر خروجی و پارامترهای مشخصات خاک به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده شد. شکل (۶) بهترین رابطه میان داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهد. خروجی مدل به‌صورت رابطه زیر حاصل شد:

$$\begin{aligned}
 FOS &= 0.03083c^{0.5}\gamma^{0.5}E^{0.5} \\
 &+ 0.0036552c^{0.5}\gamma^{0.5}E^{0.5}\nu^{0.5}\phi^{0.5} \\
 &+ 1.2769e^{-6}c^{0.5}\gamma^2\phi^2 \\
 &- 1.3148e^{-6}c\gamma^{0.5}E\phi^2 - 0.64042
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

که در آن  $c$  و  $\phi$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده خاک،  $\gamma$  وزن مخصوص طبیعی،  $E$  مدول ارتجاعی و  $\nu$  مدول پواسون خاک هستند. مشاهده می‌شود که مقدار COD برای این تحلیل برابر ۹۷/۹۰۸ بوده است.

خاک بیشتر و تأثیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک کمتر از سایر پارامترها بوده است.

#### ۵- مراجع

Askari A, Gholami A, "Effect of nail's orientation and length on soil-nailed retaining structures' stability", The Journal of the Deep Foundations Institute, 2017, 11 (1),

Fan CC, Luo JH, "Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes", Computers and Geotechnics, 2008, 35, 585-599.

Giustolisi O, Savic DA, "A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression", Journal of Hydroinformatics, IWA-IAHR Publishing, UK, 2006, 8 (3), 207-222.

Goldstein N, "Soil Nailing", [http://www.forester.net/ec\\_0109\\_soil.html](http://www.forester.net/ec_0109_soil.html), 2001.

Guilloux A, Notte G, Gonin H, "Experince on a retaining structure by nailing", proceeding of VIII, Conference of I.C.S.M.F.E. Stockholm, 1983.

Khandelwal M, Singh TN, Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 27 (2), 116-125.

KUTC, Newsletter, Kansas Local Technical Assistance Program (LTAP), at the University of Kansas Transportation Center, Spring 2006.

Monjezi M, Aminikhoshalan H, Yazdianvarjani A, "Prediction of flyrock and backbreak in open pit blasting operation: a neurogenetic approach", Arab Journal Geosci, 2010.

Monjezi M, Bahrami A, Yazdian A, Sayadi AR, "Prediction and controlling of flyrock in blasting operation using artificial neural network", Arab J Geosci, 2009.

Rezania M, Javadi AA, Giustolisi O, "An evolutionary-based data mining technique for assessment of civil engineering systems", Journal of Engineering Computations, 2008, 25 (6), 500-517.

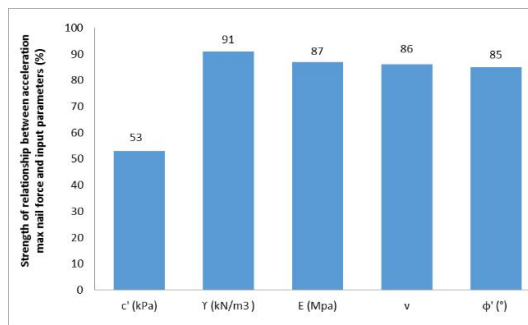
Singh S, "Soil nailing for stability of slopes", EJGE, 2017, Vol. 22.

Tang QL, Jiang QM, "Stability Analysis of Slope under Different Soil Nailing Parameters Based on the GeoStudio", IJGE 2015, 1 (2), 88-92.

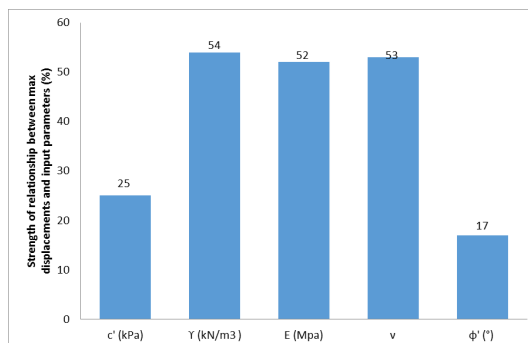
Wei WB, Cheng YM, "Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods", Computers and Geotechnics, 2010, 37, 602-618.

Yang Y, Zhang Q, "A hierarchical analysis for rock engineering using artificial neural networks", Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30 (4), 207-222.

Zhou Y, Xu K, Tang X, Tham LG, "Three-Dimensional Modeling of Spatial Reinforcement of Soil Nails in a Field Slope under Surcharge Loads", Hindawi Publishing Corporation, Journal of Applied Mathematics, Article ID 926097.



شکل ۸- تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی بیشینه نیروی میخ



شکل ۹- تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی بیشینه تغییر مکان

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر پس از تحلیل ۶۵ مورد شیروانی خاکی مسلح شده با میخ کوبی توسط نرم‌افزار FLAC و محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی برای هر مدل، به‌منظور دستیابی به رابطه‌ای میان پارامتر خروجی (ضریب اطمینان) و پارامترهای ورودی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی زهکشی نشده، وزن مخصوص، ضریب ارتجاعی و مدول پواسون خاک) از نرم‌افزار EPR استفاده شد. همچنین تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی ضریب اطمینان، بیشینه نیروی میخ و تغییر مکان انجام شد. مشاهده شده که در محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاکی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را داشته‌اند. در حالی که تأثیر مدول ارتجاعی خاک از سایر پارامترهای ورودی کمتر بوده است. همچنین در رابطه با بیشینه نیروی خاک، تأثیر مدول ارتجاعی، مدول یانگ، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک تقریباً یکسان بوده و از این میان چسبندگی خاک کمترین تأثیر را داشته است.

در پایان مشاهده شد که برای محاسبه بیشینه تغییر مکان در شیروانی خاکی، تأثیر مدول ارتجاعی، مدول یانگ و وزن مخصوص

پیوست ۱- داده‌های حاصل از مدل‌سازی در FLAC

$c'$ (kPa)	$Y$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (Mpa)	$\nu$	$\varphi'$ (°)	FOS	Nail Force (kN) Max
۲	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۵	۰.۳۹	۷۶/۷۹
۲	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۰.۴۵	۶۳/۳۴
۲	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۰.۵۸	۶/۶۱
۲	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۰.۹۴	۰.۷/۷۲
۲	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۱/۳۷	۷/۸۷
۵	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۵	۰.۷۴	۲۶/۵۶
۵	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۱/۱	۲۲/۹۹
۵	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۱/۶۱	۶/۴۰
۵	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۲/۱۵	۲۹/۸۶
۵	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۲/۸	۴۱/۶۸
۱۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۵	۱/۱۸	۵۸/۳۰
۱۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۱/۶۷	۵۷/۷۲
۱۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۲/۰.۸	۹۲/۸۸
۱۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۲/۴۵	۷۳/۹۷
۱۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۳/۲۳	۹۱/۸۵
۲۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۵	۲/۰.۴	۵۷۴/۶
۲۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۲/۵۹	۹۸۱۴/۰
۲۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۲/۹۷	۸۶۷/۱۰
۲۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۳/۳۶	۸۵۴۳/۰
۲۰	۲۰	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۳/۹۱	۶۵۴/۰
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۵	۰/۳	۵۶/۷۰
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۰/۴	۰.۳/۲۰
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۰/۵	۶۷/۵۵
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۰/۸	۹۷/۶۵
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۱/۲	۹/۷۸
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۵	۰/۲۵	۵۶/۶۸
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۰/۳۷	۴۳/۲۰
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۰/۴۸	۱/۵۰
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۰/۸۸	۳/۶۶
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۱/۲	۴۳۲/۷۷
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۵	۰/۳	۲/۶۹
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۱۵	۰/۴	۵۴/۱۹
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۲۵	۰/۵۱	۵/۵۰
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۳۵	۰/۸۶	۵۹
۲	۱۸	۱۵	۰.۳۵	۴۵	۱/۲۸	۸۶
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۵	۰/۴۵	۶۵
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۱۵	۰/۴۹	۵/۱۸
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۲۵	۰/۶۵	۵/۵۳
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۳۵	۰/۹۷	۴/۶۰
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۴۵	۱/۴۳	۰.۲/۷۰
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۵	۰/۳۹	۶/۶۴
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۱۵	۰/۵۵	۷/۱۵
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۲۵	۰/۶۲	۶۳/۴۵
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۳۵	۰/۹۵	۵/۶۱
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۴۵	۱/۴۳	۳/۷۴
۲	۱۸	۲۵	۰.۳۵	۵	۰/۶۵	۳/۶۱

ادامه پیوست ۱

$c'$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (Mpa)	$\nu$	$\phi'$ (°)	FOS	Nail Force (kN) Max
۲	۱۸	۲۵	۰/۳۵	۱۵	۰/۸	۱۷
۲	۱۸	۲۵	۰/۳۵	۲۵	۰/۹۸	۹۸/۴۵
۲	۱۸	۲۵	۰/۳۵	۳۵	۱/۱	۵۳
۲	۱۸	۲۵	۰/۳۵	۴۵	۱/۴	۳/۸۱
۲	۲۰	۱۵	۰/۲	۵	۰/۳۴	۸۷
۲	۲۰	۱۵	۰/۲	۱۵	۰/۴۱	۵/۳۱
۲	۲۰	۱۵	۰/۲	۲۵	۰/۵۱	۶۷
۲	۲۰	۱۵	۰/۲	۳۵	۰/۸۷	۷۸
۲	۲۰	۱۵	۰/۲	۴۵	۱/۲۹	۹۲
۵	۲۰	۱۵	۰/۲	۵	۰/۷	۶۶
۵	۲۰	۱۵	۰/۲	۱۵	۱/۰۳	۵/۱۰۲
۵	۲۰	۱۵	۰/۲	۲۵	۱/۵	۵/۴۵
۵	۲۰	۱۵	۰/۲	۳۵	۲/۰۵	۵/۹۳
۵	۲۰	۱۵	۰/۲	۴۵	۲/۶۷	۷۳
۱۰	۲۰	۱۵	۰/۲	۵	۱/۱۳	۷/۳۴
۱۰	۲۰	۱۵	۰/۲	۱۵	۱/۵۴	۵/۷۷
۱۰	۲۰	۱۵	۰/۲	۲۵	۱/۹۸	۷/۹۴
۱۰	۲۰	۱۵	۰/۲	۳۵	۲/۴۰	۸/۱۰۵
۱۰	۲۰	۱۵	۰/۲	۴۵	۳/۰۵	۶/۸۸



## EXTENDED ABSTRACT

# The Effect of Soil Parameters on mechanical Behavior of Soil Nailed Slope

Ahad Bagherzadeh Khalkhali <sup>a,\*</sup>, Seyyed Mojtaba Ghadamgahi <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Science and Research Branch, Tehran, Iran

Received: 15 Junr 2017; Accepted: 24 August 2018

### Keywords:

Fatigue, Stress concentration factor (SCF), Tubular KT-joint, Internal ring-stiffener, Parametric equation.

## 1. Introduction

Due to the participation of a large number of factors involved, one of the complex problems in geotechnics is stabilized soil slope stability analysis. We aim to present the results of investigations on the safety factor (FOS), nail force and displacement of soil slopes reinforced with nailing. In this research, a numerical study was followed by presentation a novel method, based on evolutionary polynomial regression (EPR) for capturing nonlinear interaction between various parameters of FS on the nail-soil slope for 65 cases. In order to attain the most effective factors on FOS, soil nail's force and displacement, the cosine amplitude method (CAM), is considered.

## 2. Methodology

### 2.1. Numerical Study

A parametric study for a homogeneous soil slope with a slope height equal to 6 m and slope angle equal to 45 is conducted, using the same slope geometry and soil nail distribution as the example in Fig. 1.

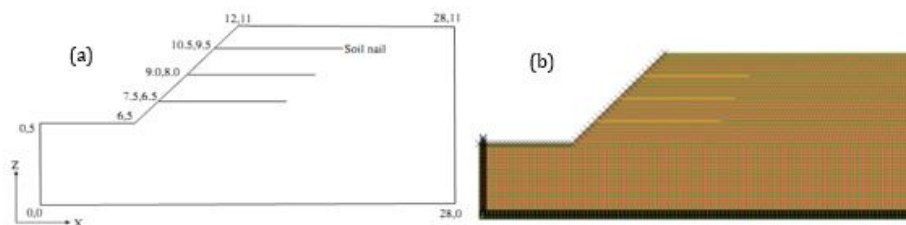


Fig. 1. (a) Soil nailed slope model, (b) 2D soil nailed slope model

In this parametric study, different shear strength properties, poisson's ratio, and densities are used. In order to investigate the FOS of reinforced soil slopes, 65 models were generated and analyzed in FLAC 2D. The objective was to study the effect of shear strength parameters on FOS. The cohesion of the soil varies among 2, 5, 10, and 20 kPa, while the friction angle varies among 5, 15, 25, 35, and 45, respectively. Different values assigned to each soil parameter are as follows: Poisson ratio ( $\nu$ ) = 0.2-0.35, Density ( $\gamma$ ) = 15-25 MPa, Elastic modulus ( $E_s$ ) = 18-20 kN/m<sup>3</sup>. The parameters used for the study are shown in Table 1. The diameter of the steel bar is 40 mm, and the grouting bore-hole's diameter is 100 mm (Wei and Cheng, 2010).

\* Corresponding Author

E-mail addresses: a-bagherzadeh@srbiau.ac.ir (Ahad Bagherzadeh Khalkhali), min\_moj@yahoo.com (Seyyed Mojtaba Ghadamgahi).

**Table 1.** Parameters of the grout-soil-nail system (Wei and Cheng, 2010)

Young's modulus of the grouted nail, E (GPa)	45.44
Shear zone cohesive strength (force) per unit length, cg (kN/m)	1.41
Shear zone friction angle, /g (°)	9.23
Shear zone stiffness per unit length, kg (MPa)	43.1
Shear zone exposed perimeter, pg (m)	0.339
Cross-sectional area of the grouted nail, A (m <sup>2</sup> )	0.00785
Compressive yield strength of the grouted nail (force), Fc (MN)	0.238
Tensile yield strength of the grouted nail (force), Ft (MN)	0.238

**2.2. Evolutionary Polynomial Regression (EPR)**

To avoid the problem of mathematical expressions growing rapidly in length with time associated with genetic programming (GP), in EPR, the evolutionary procedure is conducted in the way that it searches for the exponents of a polynomial function with a fixed maximum number of terms, rather than performing a general evolutionary search as used in normal GP. Furthermore, during one execution, it returns a number of expressions with increasing numbers of terms up to a limit set by the user, to allow the optimum number of terms to be selected (Rezania et al. 2008).

**2.3. Cosine amplitude method**

In order to attain the most effective factors on the CSR and ΔH, the cosine amplitude method (CAM), is considered (Yang and Zhang 1997; Monjezi et al. 2009). The expressed similarity relation between the target function and the input parameters is used to obtain by this method. In this method, all of the data pairs are expressed in the common X-space. They would form a data array X defined as Eq. (1) (Yong-Hun and Chung-In 2004; Khandelwal and Singh 2006; Monjezi et al. 2010):

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n\} \tag{1}$$

Where each element, xi, is a vector of the length of m and is shown in Eq. (2).

$$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\} \tag{2}$$

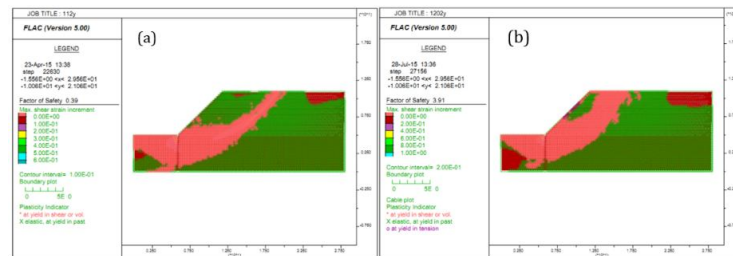
Thus, each of the datasets can be considered as a point in the m-dimensional space, where each point requires m-coordinates to be fully described (Monjezi et al. 2010). The strength of the relationship between xi and xj is given by Eq. (3).

$$r_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^k x_{im}x_{jm}}{\sqrt{\sum_{m=1}^k x_{im}^2 \sum_{m=1}^k x_{jm}^2}} \tag{3}$$

**3. Results and discussion**

**3.1. Effect of shear parameters on FOS**

Two model results are shown, for example in Fig. 2 corresponding cases with c=2 kPa, φ=5° and c=20 kPa, φ= 45° respectively. Overall results show that increasing soil cohesion and friction angle leads to an increase in FOS.



**Fig. 2.** Slip surface for soil nailed slope: (a) c=2 kPa, φ=5°, (b) c=20 kPa, φ= 45°

### 3.2. Sensitivity analysis

Regarding the mentioned formula in previous sections, the strength of the relationship between FOS and input parameters, nail force and input parameters also and displacement and input are investigated. The results show that cohesion and friction angle are the most influential factors on the FOS value. Also, the cohesion is the least sensitive parameter affecting on nail force. Finally, the poisson's ratio, density, and elastic modulus are the most influential factors on the displacement value.

### 4. Conclusions

A detailed study of nailed slopes under different conditions is reported in this paper. 65 soil nailed slopes analyzed in FLAC 2D and results show that increasing soil cohesion and friction angle leads to an increase in FOS. Then a relationship presented for evaluate FOS from input parameters (soil characteristics). The values of COV for the training set of the selected model were 97.908. The results if sensitivity analyses showed that cohesion and friction angle are the most influential factors on the FOS value. Also, the cohesion is the least sensitive parameter affecting on the nail's force. Finally the poisson's ratio, density, and elastic modulus are the most influential factors on the displacement value.

### 5. References

- Fan CC, Luo JH, "Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes", *Computers and Geotechnics*, 2008, 35, 585-599.
- Giustolisi O, Savic DA, "A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression", *Journal of Hydroinformatics*, IWA-IAHR Publishing, UK, 2006, 8 (3), 207-222.
- Goldstein N, "Soil Nailing", [http://www.forester.net/ec\\_0109\\_soil.html](http://www.forester.net/ec_0109_soil.html), 2001.
- Guilloux A, Notte G, Gonin H, "Experince on a retaining structure by nailing", proceeding of VIII, Conference of I.C.S.M.F.E. Stockholm, 1983.
- Khandelwal M, Singh TN, Evaluation of blast-induced ground vibration predictors, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 27 (2), 116-125.
- KUTC, Newsletter, Kansas Local Technical Assistance Program (LTAP), at the University of Kansas Transportation Center, Spring 2006.
- Monjezi M, Aminikhoshalan H, Yazdianvarjani A, "Prediction of flyrock and backbreak in open pit blasting operation: a neurogenetic approach", *Arab J Geosci*, 2010.
- Monjezi M, Bahrami A, Yazdian A, Sayadi AR, "Prediction and controlling of flyrock in blasting operation using artificial neural network", *Arab J Geosci*, 2009.
- Rezania M, Javadi AA, Giustolisi O, "An evolutionary-based data mining technique for assessment of civil engineering systems", *Journal of Engineering Computations*, 2008, 25 (6), 500-517.
- Wei WB, Cheng YM, "Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods", *Computers and Geotechnics*, 2010, 37, 602-618.
- Yang Y, Zhang Q, "A hierarchical analysis for rock engineering using artificial neural networks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1997, 30 (4), 207-222.
- Zhou Y, Xu K, Tang X, Tham LG, "Three-Dimensional Modeling of Spatial Reinforcement of Soil Nails in a Field Slope under Surcharge Loads", Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 926097.